干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

乌兹别克斯坦灌溉农业发展及其对生态环境和经济发展的影响

李 琦[1,2]， 李发东[1,2,3]， 王国勤[1,4]， 乔云峰[1,3]， Rashid KULMATOV[5]，
彭 宇[1,3]， Sayidjakhon KHASANOV[6]， 刘洪光[2]， 何新林[2]， 杨 广[2]

（1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室，北京 100101；2. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 联合国环境署–国际生态系统管理伙伴关系，北京 100101；5. 乌兹别克斯坦国立大学，乌兹别克斯坦 塔什干 100170；6. 塔什干灌溉和农业机械化工程研究所，乌兹别克斯坦 塔什干 100000）

摘 要：乌兹别克斯坦作为中亚干旱区重要的农业大国，由于其独有的气候条件，灌溉是决定其农业生产的主要控制因素，因此，研究其灌溉农业发展历程对于保障农业生产与自然环境安全具有重要意义。通过查阅乌兹别克斯坦灌溉农业发展领域的相关文献，结合联合国粮食及农业组织、联合国数据检索系统等官方网站提供的资料数据，总结灌溉农田面积、人口、主要作物产量及农业产值等数据的变化规律，阐述了乌兹别克斯坦灌溉农业的发展历程，分析讨论由农业灌溉引起的一系列环境问题及其对社会经济的影响。结果表明：(1) 由于气候干旱少雨，乌兹别克斯坦灌溉用水主要来自阿姆河及锡尔河，下游河道径流量及咸海蓄水量持续下降，暴露河床内大量松散沉积物并导致频繁的沙尘天气。(2) 乌兹别克斯坦整体农业灌溉技术较为落后，过度引水使得部分地表径流汇聚在灌区低洼地带，抬升地下水位，最终引发严重的区域土壤盐渍化，故全面推广先进灌排技术，是该国未来灌溉农业与生态环境健康发展的主要方向。(3) 农业生产是乌兹别克斯坦重要的经济来源，对国内生产总值有显著的正向影响。此研究可为干旱区农业发展及水资源管理提供借鉴。

关 键 词：灌溉；干旱区；农业；棉花；小麦；乌兹别克斯坦；中亚
文章编号：

近年来，干旱地区农业生产已逐步成为导致环境恶化的主要因素之一，不断增长的粮食需求与脆弱的环境现状之间的矛盾日益突出。预计到2050年，全球粮食产量需求较2005年增长100%~110%，提高生产力低下地区的农业生产效率，可在实现全球粮食增产目标的同时，最大程度地保护自然环境。作物产量的变动在很大程度上取决于当地化肥施用量及灌溉管理[1-2]。干旱地区作为陆地环境的重要组成部分，覆盖全球陆地面积40%以上，养育世界38%的人口，其中具备典型干旱气候特征的中亚五国占地4×10^8 hm^2，具有巨大的粮食增产空间[3-4]。

作为中亚地区典型的农业国家，乌兹别克斯坦拥有悠久的农业灌溉历史，其农业生产贡献了近30%的国内生产总值(GDP)，其中灌溉土地提供了90%以上的作物产量[5]。锡尔河与阿姆河作为乌兹别克斯坦最重要的灌溉水来源，分别为44%和56%的灌溉农田提供水源[6]，但受到降水变化与雪水储存能力的影响较大[7]，两条河流的径流量在21世纪初的10 a内均减少了约5%[8]。在近30 a农业发展史中，乌兹别克斯坦的主要农作物逐渐从棉花转型

收稿日期：2020-12-29； **修订日期**：2021-04-14
基金项目：中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA20040302)；国家自然科学基金(U1803244)；八师石河子市科技计划项目(2019ZH13，2021BC003)资助
作者简介：李琦(1997-)，男，硕士，主要从事土壤水盐动态模拟研究. E-mail: liqiyr@yeah.net
通讯作者：李发东(1972-)，男，博士，研究员，主要从事农业生态水文水环境与环境氮污染研究. E-mail: lifadong@igsnrr.ac.cn

至棉花与小麦均衡发展的局面，国内现有棉花耗水量约占农业用水总量的30%，且几乎全部依赖灌溉；而冬小麦的用水量可从降雨中获取部分补给，相同面积的小麦仅消耗棉花60%~70%的用水量，种植结构的调整一定程度上缓解了农业用水紧张[9]。早在20世纪30年代苏联政府曾拨款修建大费尔干纳运河用以缓解乌兹别克斯坦用水困难[10]，但受限于稀缺的水资源，其农业发展进入了瓶颈期。苏联解体后，乌兹别克斯坦农业灌溉依旧依靠水库及长达1.7×10^5 km的水渠，低效的土渠输送及粗放的大水漫灌难以得到改善，加之陈旧的灌溉装置与落后的技术等多因素共同作用，促成如今的用水困境。漫灌还引发土壤大面积盐渍化的问题[11]，乌兹别克斯坦以其2.1×10^6 hm^2盐渍土面积，已经成为土壤盐渍化面积第六大的国家[12]，引起阿姆河河水含盐量升高[13]，其汇入点咸海海水的矿化度于20世纪末从10 $g\cdot L^{-1}$升高至超过100 $g\cdot L^{-1}$，储水量萎缩了近80%[14]。土壤盐渍化及漫灌导致腐殖质流失，棉花产量降低约30%，每公顷棉花仅创造约700 USD的经济价值，造成乌兹别克斯坦每年约10^9 USD的财政损失[15]。

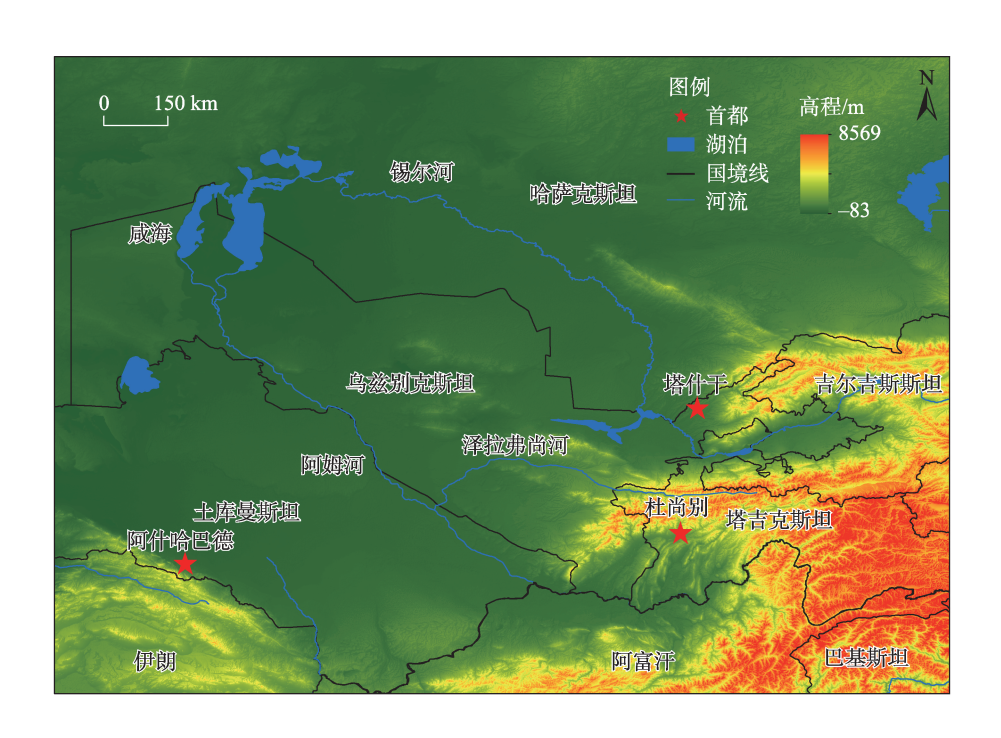
然而，目前有关乌兹别克斯坦农业灌溉与生产之间的系统阐述较少，本文旨在通过对该国农业灌溉面积、人口及经济发展等历史资料的梳理，明确乌兹别克斯坦灌溉农业的发展历程，并分析由灌溉农业引起一系列环境问题的原因，为干旱地区农业发展及水资源管理提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌兹别克斯坦位于41°16′N，69°13′E，大陆性气候，西北部与哈萨克斯坦接壤，东部与吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦接壤，南部与土库曼斯坦接壤，西北部紧邻咸海（图1），全境地势东高西低，平原低地占全部面积的80%，大部分位于西北部的克孜勒库姆沙漠[16]。气候平原低地年均降水量约为80~200 mm，山区可达1000 mm，且多发于10月至4月[17]。夏季平原地区气温约42~47 ℃，山区25~30 ℃，冬季北部气温约−11 ℃，南部2~3 ℃[18]。国内主要河流有阿姆河、锡尔河和泽拉弗尚河。

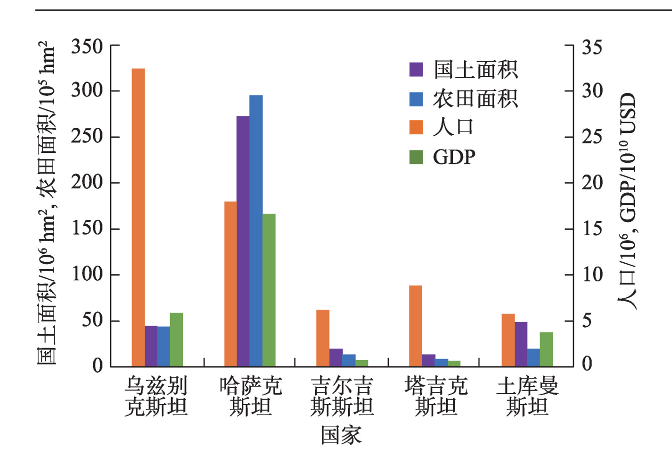
如图2所示，2017年乌兹别克斯坦是中亚地区人口最多的国家，总人口3.2×10^7人；年GDP5.9×10^{10} USD，占中亚地区GDP的21%；其国土总面积4.49×10^7 hm^2，占中亚地区总面积的11.2%；拥有农田种植面积4.42×10^6 hm^2，占中亚地区农田总面积的11.5%，是除哈萨克斯坦外，农田面积占比最高的国



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2020)4393号的标准地图制作。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area



注：数据来源于联合国数据检索系统。

图2 2017年中亚五国基本国情

Fig. 2 Basic national conditions of the five Central Asian countries in 2017

家；其灌溉农业贡献约90%的农业产量，消耗全国90%的可利用水资源量[19]。

1.2 研究方法

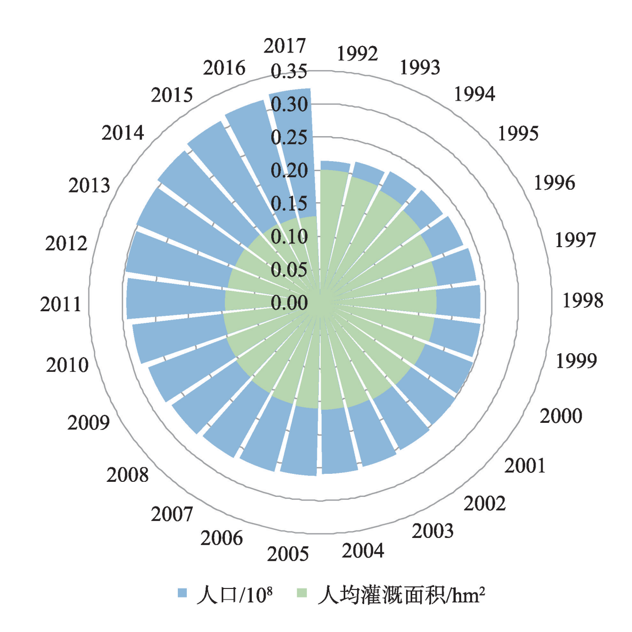
本文通过查阅近30 a来有关乌兹别克斯坦灌溉农业的中英文文献，根据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations)、联合国数据检索系统(United Nations Data Retrieval System)及乌兹别克斯坦国家统计局(The State Committee of the Republic of Uzbekistan on Statistics)最新数据，通过总结灌溉农田面积、人口、主要作物产量及农业产值等数据的变化规律，结合研究区生态环境及经济发展相关文献资料，梳理乌兹别克斯坦近100 a来灌溉农业发展史，并分析灌溉农业对环境及社会经济的影响。

2 结果与讨论

2.1 乌兹别克斯坦灌溉农业发展历程

2.1.1 水利设施修建阶段 2500年前，现乌兹别克斯坦地区就已步入灌溉农业初期阶段，公元前4世纪至公元2世纪，中亚阿姆河(Amu Darya)、泽拉弗尚河(Zeravshan River)和卡什卡达里亚河(Kashkadarya River)流域有约$3.5×10^6$ hm²灌溉农田[20]。在随后的200 a内，中亚地区灌溉面积急剧减少。直到公元7世纪，灌溉农业逐渐复兴，9世纪开始迅速发展。公元12—14世纪，阿姆河和锡尔河下游的总面积为$2.4×10^6$ hm²。19世纪前，中亚地区重新设计灌溉系统，进入农业水利基础建设阶段，这段时期内兴建了大量窄而深的河道、高压水坝、泄洪道及其他供水设施[21]。

如图3所示，在20世纪初，乌兹别克斯坦大约有$1.2×10^6$ hm²灌溉农田，1913年沙皇俄国时期，增加至$1.4×10^6$ hm²。虽然十月革命期间灌区面积出现短暂减少，但很快在1928年又逐渐恢复到1913年的灌区面积。第二次世界大战前，乌兹别克斯坦建造了许多大型运河、水工建筑物，灌溉面积达到$1.9×10^6$ hm²，二战后增至$2.2×10^6$ hm²[22]。



注：数据来源于联合国统计司。下同。

图3 1900—2017年乌兹别克斯坦灌溉面积变化

Fig. 3 Changes in irrigated area in Uzbekistan during 1900—2017

2.1.2 灌溉规模高速发展阶段 乌兹别克斯坦灌溉农业的大规模发展开始于20世纪50年代末，彼时总灌溉面积约为$2.2×10^6$ hm²。由于苏联政府特命乌兹别克斯坦专业从事棉花生产，故国内灌溉面积逐渐变大，主要分布于无人居住、气候条件恶劣的干旱和半干旱地区。1970—1985年随着灌溉技术的发展，开始建设排水管网和排水井，初步形成了完整的灌排系统[23]。国家东北部的塔什干山谷(Tashkent Valley)、东部的费尔干纳山谷(Fergana Valley)、中东部地区的泽拉弗尚山谷(Zeravshan Valley)、东南部的卡什卡达里亚谷(Kashkadarya Valley)、东南部的苏尔汉河流域(Surkhandarya)、中西部地区的花拉子模(Khorezm)及西北部的卡拉卡尔帕克斯坦(Karakalpakstan)是其灌溉农业发源地，现代灌溉技术发展于乌兹别克斯坦中部锡尔德里亚盆地的饥饿草原(Hunger Steppe)和东南部阿姆德里

亚盆地的卡尔什大草原(Karshi Steppe)。在此期间，乌兹别克斯坦灌溉面积平均以9×10⁴ hm²·a⁻¹的速度增长，实行严格的水资源管理和农业灌溉制度，并随着哥洛内亚、治扎克和卡尔西大草原的开垦，灌溉农业进入高效发展阶段。直到80年代末新开发出10×10⁴ hm²的新灌区，总灌溉面积达到4×10⁶ hm²[21]。

2.1.3　*灌溉技术发展停滞阶段*　90年代后全国灌溉面积基本稳定在4.2×10⁶ hm²，占总耕地面积的86%，2005年增加至89%，但由于配备灌溉设施的面积减少，部分农田已被废弃，实际灌溉面积约3.7×10⁶ hm²，其中分别约有44%、56%处于锡尔河和阿姆河流域，灌溉作物产量占总产量90%以上[24]。随着人口总量逐年攀升，2017年乌兹别克斯坦人均灌溉面积较1992年降低约35%。

乌兹别克斯坦所有灌溉农田均为完全控制灌溉，水源主要来自地表水，其中通过河流改道引水占灌溉用水量的43%，使用水泵从河流、水库和地下水中抽水分别占27%、24%和6%，但后者抽水方式较为粗放，整体依靠约1500台水泵与1.96×10⁵ km的输水网络。这套输配水系统79%是无防渗的土渠，仅有少部分采用了混凝土防渗处理，整体输送效率较低[25]。田间灌溉技术同样落后，全国99.9%的土地实行地面灌溉，其中有67.9%为沟灌，其次是畦灌(26%)、漫灌(4%)和其他类型地面灌溉(2%)。较为先进的局部灌溉技术，如喷灌、滴灌等仅占0.1%，后来由于成本的提升与装置的不足，基本失去实用价值[9]。

灌溉农业在乌兹别克斯坦拥有悠久的历史，是其重要的经济支柱，全国灌溉面积整体逐年增长，但在战争或政治动荡等重大历史突发事件的时间点上易出现突变。由于其高速增长的人口基数，人均灌溉面积呈现逐年减少的趋势，另外始终较为落后的输水系统及灌溉技术，致使整体节水灌溉力度尚显不足，是其农业耗水量难以得到有效控制的重要因素。

2.2　农业种植结构的变化

乌兹别克斯坦拥有充足的棉、丝、麻制品出口量，向来是我国重要的进口来源[26]。但2018年乌兹别克斯坦的棉花产量仅为1991年的67%，减产明显。亚洲开发银行(ADB)于2003年资助阿姆河灌溉改造项目，帮助南苏尔汉河省政府提高水资源管理能力，恢复阿姆河与苏尔汉河的交汇处附近1×10⁵ hm²农田与数百公里的田间排水渠，解决约4×10⁵农业人口的生计和发展问题。

因受地理环境因素的限制，乌兹别克斯坦难以开垦新绿洲，总灌溉面积趋于稳定。为了应对萎靡的经济发展及急迫的粮食需求，国家积极拨款补助，鼓励农业生产工作，需水量少的小麦逐渐取代棉花，成为乌兹别克斯坦最主要的作物类型。如图4所示，2016年小麦产量已较21世纪初增长了100%[27]。

种植转型后，小麦增产效果十分显著；随着棉花种植面积的持续走低，加之日渐严峻的环境问题，棉花产量呈现整体下降趋势。另一方面，仅种植棉花时，10月至来年3月休耕期内，田内灌溉系统可以得到妥善清理及维护，棉花产量在非极端气候

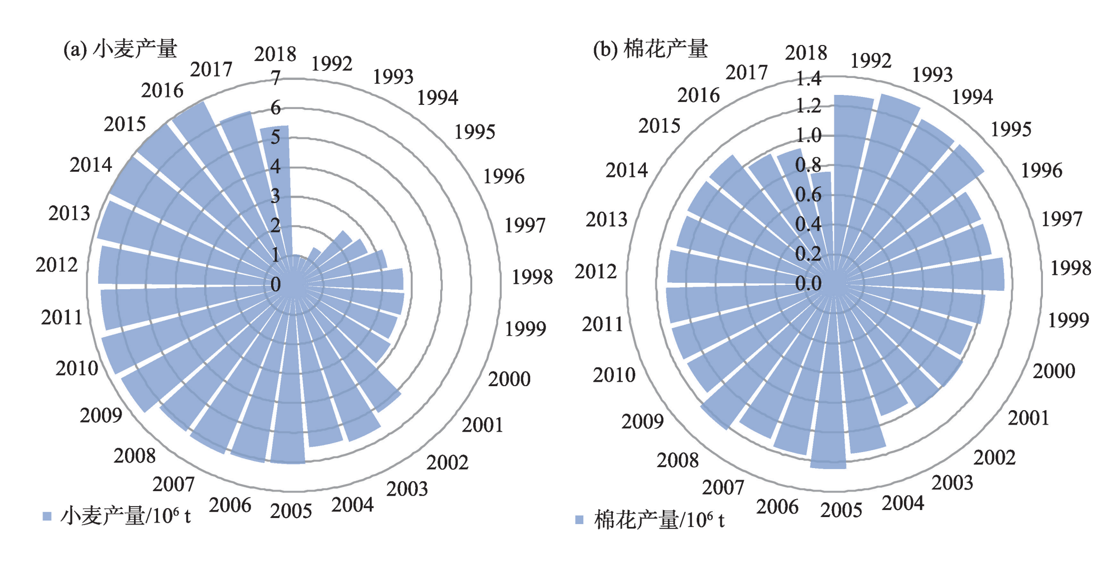


图4　1990—2020年乌兹别克斯坦主要农作物产量

Fig. 4　Changes in the yield of major crops in Uzbekistan during 1990—2020

年份内能得到保障[28]。冬小麦整个生长周期内，蒸散量虽低，但仍需5~6次灌溉，随着种植面积的大幅度增加，灌排网络不得不持续运转。据统计灌溉小麦产量为4400 $kg\cdot hm^{-2}$，雨养小麦仅为1500 $kg\cdot hm^{-2}$[9]，因此为保障小麦产量，灌排系统几乎全年运行，加重装置折旧破损并产生泄漏损失，逐渐于2003年开始，小麦产量增速逐渐降低。

2016年以来，乌兹别克斯坦逐渐将农田种植类型由粮食转为蔬果，以改变经济结构对粮食生产的过分依赖，利用有限的土地创造更多的经济效益，并计划于2020年将 1.7×10^5 hm^2 棉花耕地转型为种植蔬果，并不再对外出口棉花，导致小麦与棉花种植面积不断缩减，产量大幅降低[29-30]。

2.3 灌溉农业对区域生态环境的影响及机理讨论

2.3.1 土壤盐渍化 灌溉农业促使乌兹别克斯坦成为中亚地区重要的农业大国，但对其生态环境同样造成了巨大影响，其中以水土安全问题最为突出：大水漫灌为主的灌溉方式，加之强烈的蒸发、日益下降的灌溉水质以及较高的地下水水位引起的土壤盐渍化。

Rakhimbaev 等[31]在对乌兹别克斯坦花拉子模地区盐碱化土壤的研究中得出结论，当矿化度超过3 $g\cdot L^{-1}$的地下水埋深不足2.0 m时，极易引发盐碱化，故乌兹别克斯坦地区可参照此方式进行地下水管理。咸海上游地区地下水位可在每年春季达到1.5 m的临界水平，限制当地早春农田淋洗的效率，农户难以在种植作物前降低土壤剖面中的盐分含量。7月（作物生长高峰期）地下水位达到一年中最小值，意味着土壤根区盐分含量持续上升，但在此期间的灌溉可一定程度的上抵消浅层土壤盐分累积的现象。自1996年以来，全国种植结构发生改变，大量引入的冬小麦在生长后期需要追加灌溉，导致10月地下水水位出现同比上升的迹象，地下水位在作物生长季节以外的时间抬升约0.7 m[32]。1994年，乌兹别克斯坦共有约 3.3×10^6 hm^2 灌溉土地因地下水位过浅或土壤含盐量过高需要排水，但其中仅有85%具备排水条件，且多数依靠未经硬化的明沟排水技术。这种不健全的供排水系统源源不断地将大量高矿化度灌溉水渗漏至地下，并在浅中层土壤中富集，最终导致土壤理化性质逐年恶化。彼时乌兹别克斯坦约50%的灌溉土地被中亚国家列为盐碱地，其中阿姆河与锡尔河流域上游，近10%的土地含盐量超标；卡拉卡尔帕克斯坦等下游地区，约95%的土地出现不同程度的盐渍化。此外，不同类型的土壤对盐渍化形成的响应速度略有不同，中度和重度质地土壤因含有较多黏性土颗粒，毛管孔隙率较大，故更易出现土壤盐渍化问题。例如中亚地区最大的无自然排水系统的吉扎克（Jizzakh）灌区为保障作物产量，在1995—2016年施用大量化肥，导致土壤盐渍化程度逐年加重。如今仅有约17.7%的耕地未发生盐渍化，51.3%、29.0%、2.0%的耕地分别出现轻微、中度、高度盐渍化，灌区内约13.1%的地下水平均矿化度小于1.0 $g\cdot L^{-1}$，10.5%在5.1~10.0 $g\cdot L^{-1}$范围内波动，其余地区地下水平均矿化度基本维持在1.1~5.0 $g\cdot L^{-1}$之间[19]。

近年来，蒸发量增加、中亚冰川长期径流减少和频繁的极端干旱迫使灌溉水量逐渐上升，远离灌渠的地区通过抽取地下水以应对频繁的水资源短缺，进而使得大量盐分被转移并滞留在土壤根区，土壤盐渍化程度进一步恶化。即使是具有健康土壤养分背景值的农田，长期灌溉地下水后土壤剖面也会输入大量来自高地下水位的盐分，因此仍需要足量水及健全的排水网络用于土壤盐分淋洗，预防土壤盐碱化、农田生产力降低。例如位于阿姆河中下游地区的灌区，地表水资源与土地资源质量均不容乐观，仅有具备完善灌排系统的纳沃伊地区（Navoi Region）在2000—2015年期间地下水水位和土壤盐度略有改善[33]。

2.3.2 咸海危机 对于远离海洋的干旱地区而言，河湖生态系统对维持人类活动及流域内生态稳定发展发挥着不可替代的作用。咸海位于乌兹别克斯坦西北部，曾是世界上最大的典型内陆湖泊之一，过去50 a间高强度人类活动和频发极端气候对其造成了毁灭性的破坏。20世纪60年代，咸海海拔53 m，蓄水量超过1000 km^3，却很快于1987年分裂为2个盆地：北部的小咸海和南部的大咸海[34]。这是由于随着咸海流域大量引水灌溉与强烈蒸发的出现，汇入咸海的河流流量逐年降低，阿姆河向咸海输送的年均流量为 8.48×10^9 m^3，并在1987—2011年呈现波动下降的趋势，年均下降 2.86×10^8 m^3；锡尔河向咸海输送的年均流量为 5.79×10^9 m^3，虽然以 2.51×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$的增速逐渐提高，但由于其总流量不及阿姆河，最终导致咸海在20世纪90年代出现快速萎缩的态势，但自2002年后蓄水量减少的速度逐渐放缓，蓄水量整体趋于稳定。1992年，咸海流域约80%径流量被用于农田灌溉，汇入咸海的水量大

幅减少，水位快速降低，蓄水量在20世纪90年代累积损失约50%[35-36]。如图5所示，2006年，海平面大约下降了30 m，矿化度累积至109 g·L^{-1}。水域面积从1981年的4.7×10^6~4.8×10^6 hm^{2}骤降到2013年1.2×10^6 hm^2，海水矿化度高达130 g·L^{-1}，破坏当地农田生态系统的水分转化过程，对区域水平衡构成严重威胁[37]。上游引水灌溉如果不加以管理，咸海预计到2057年便会彻底蒸发消失[38]。

已有研究表明，中亚地区干旱气候的演变与北大西洋及里海等上游水体蒸发强弱之间存在一定的相关性[39]。中亚干旱地区地势形态和土地利用情况十分复杂，地处上风向的咸海，增温速率达0.4 ℃·(10a)$^{-1}$以上，其水域面积、蒸发强度的波动及其内部水文循环与气溶胶的作用也显著影响着该地区降水量的变化。但在2004—2016年，南咸海流域蒸发量与降水量分别表现出波动降低及波动上升的趋势，表明气候变化并不是咸海长期萎缩的主要驱动力[40]。作物生育期内耗水量与农田排水量均远大于非生育期，随着农田规模与灌溉需水量的扩大，来自阿姆河及锡尔河的灌溉水经农田吸收后排至周围低洼地带，形成大量零散的水域，导致部分径流无法汇入咸海。这与Conrad等人发现在作物生长季节内阿姆河下游湖泊面积会显著增大的现象相符，2002年花拉子模省内湖泊接纳附近耕地超过2.4×10^4 m^{3}农业排水，其中冬季汇入量较夏季明显降低，呈现显著的月际变化特征，这反映出湖泊的存在取决于农田灌排系统的当前配置和强度水平，低效农业灌溉所产生的盈余水量，反过来会促成流域周围中小型湖泊的形成[41]。

2000年以来，乌兹别克斯坦灌溉农业面积一直维持在较低的水平，引水灌溉的频率及强度得到一定程度的放缓，进而可以保证汇入咸海的径流量。与艾比湖在1972—2013年受到灌溉和家庭用水的密集取水后，水量减少了约31.4%的情况类似[42]。结合本文2.2节与Kai等人的研究结论可以得出，苏联解体后各国粮食政策改革的出现，导致高耗水量作物(如棉花和水稻)的种植面积逐渐减少、小麦等耗水量较低作物的种植面积不断增加，农业灌溉总需水量逐年降低、河流径流量逐年恢复，说明种植结构的转变也有助于减缓咸海盆地的萎缩。

2.3.3　盐尘暴　沙尘暴是干旱、半干旱地区较为常见的气候灾害，易造成植被及表层土壤大量流失，其形成受风力、表层土壤稳定性、大气条件共同作用，通常将含盐量较高的沙尘暴称为盐尘暴。中亚地区覆盖着超过1.5×10^7 hm^{2}的盐土，其中约10%存在于乌兹别克斯坦境内[43]。随着咸海水域面积的逐年收缩，富含大量松散沉积物的咸海盆地逐渐暴露，1981—2010年咸海盆地的干涸面积增加了4.7×10^6 hm^2，当地多强风、植被稀少、干旱周期长的气候特征使得盐尘暴的暴发频率远高于其他地区，每年

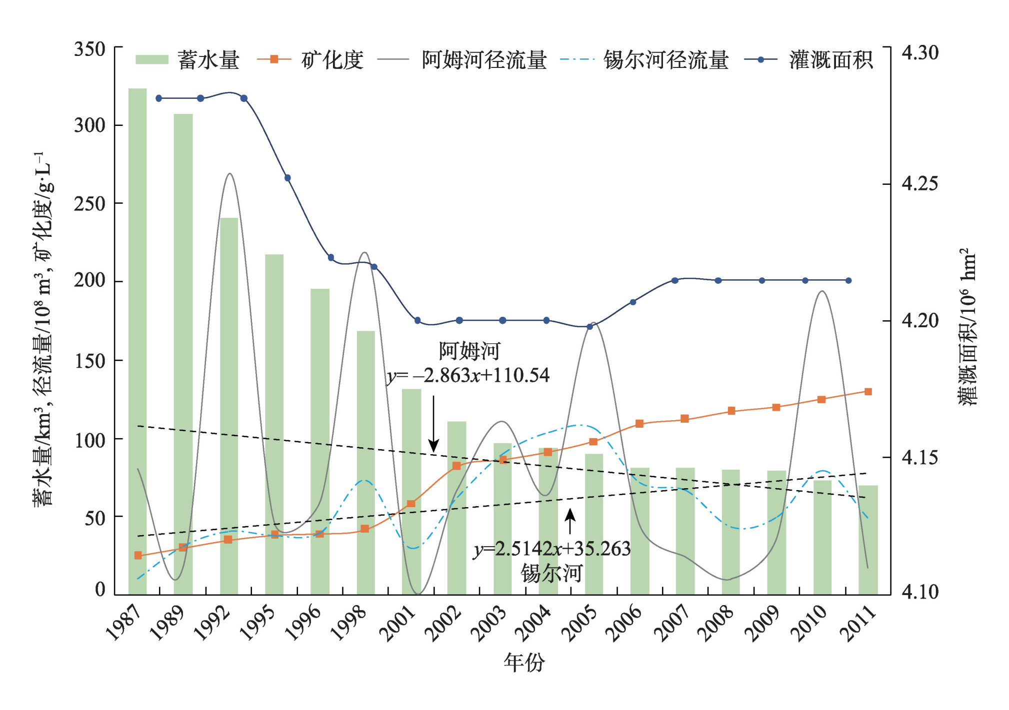


图5　1987—2011年咸海蓄水量与水质变化

Fig. 5　Changes in water quality and storage capacity of the Aral Sea during 1987—2011

将4.5×10^7~10×10^7 t的含盐粉尘从咸海流域吹向大气，最远可携带至数千公里外的喜马拉雅山、南极大陆、格陵兰的冰川、挪威的森林和白俄罗斯的农田，影响植被生长和人体呼吸道系统健康[44-45]。盐尘暴对于水文循环的影响更是显著，盐尘暴含有大量的氯盐，必然会加快周围雪山的融雪速率[46]，进而破坏下游地区河流、绿洲等生态平衡，这种反馈关系在干旱的中亚地区自然更加敏感[47]。

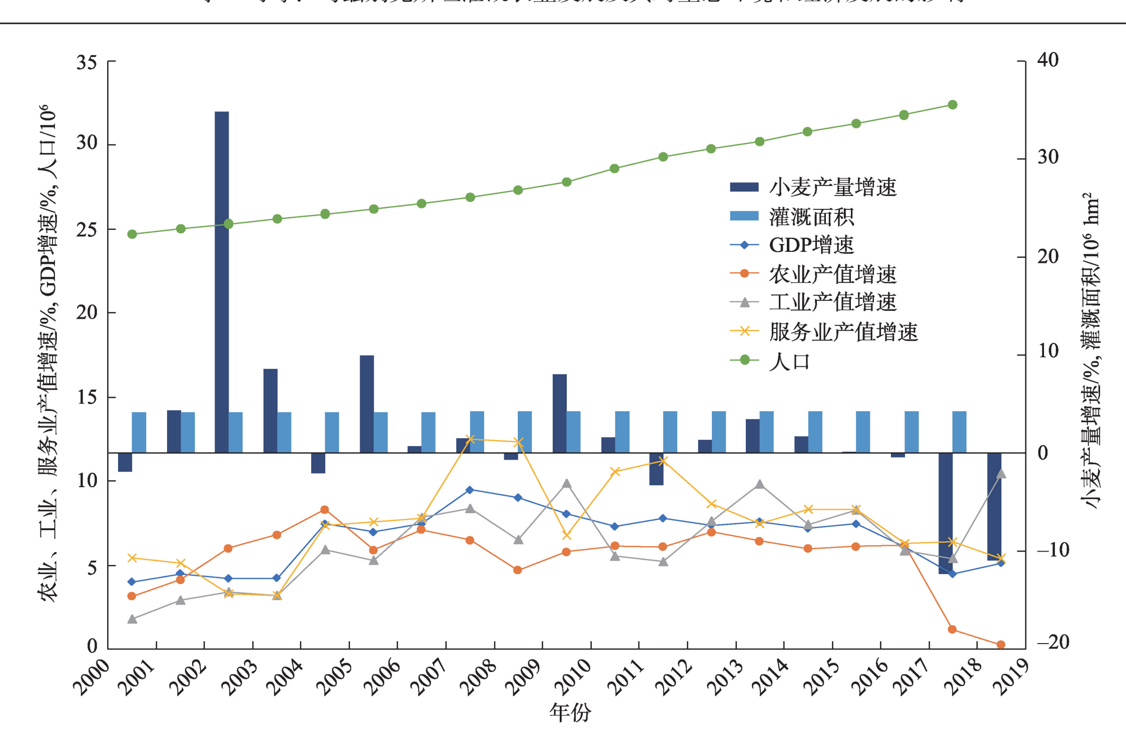
几百万年来，咸海河床源源不断地吸收着来自流域内的盐分物质及农田排水汇入的杀虫剂、除草剂等，如今逐年扩大的干涸河床成为当地灰尘和盐气溶胶的重要来源。由本文2.1.2节可知，20世纪50年代是乌兹别克斯坦灌溉农业快发展时期，一方面大量林地牧场被改造成农田，使土地防风固沙能力大幅降低；另一方面阿姆河及锡尔河部分径流被拦截至周围农田用以灌溉，河流及下游咸海河床逐渐暴露，并于2000年形成一个新沙漠——阿拉尔库姆沙漠（Aralkum）。咸海底部松散的沙子暴露在空气中，成为盐尘暴的潜在爆发点，此外，地表水总量降低使地表变暖、增加边界层的不稳定性，同样有利于沙尘暴的形成和尘埃粒子的垂向输送。这表明了咸海流域内降水、云、土壤湿度之间的耦合关系，为盐尘暴的形成提供潜在条件，这与部分学者在早期研究中所提出的关于咸海水环境危机的结论相吻合[48]。此时期中亚规模最大的沙漠卡拉库姆沙漠（Karakum）附近盐尘暴发生频率超过80 $ds\cdot a^{-1}$，中亚北部平原地区不及10 $ds\cdot a^{-1}$。而同期由于沙漠岩性覆盖的多样性，里海北部低地的纳林（Naryn）和伏尔加斯克—乌拉尔斯克沙漠（Voljsko-Uralsk），以及咸海东部地区的沙质和黏土质的基济尔库姆沙漠（Kyzylkum）盐尘暴天气出现频率适中，约20~30 $ds\cdot a^{-1}$。随着各地区陆续开荒耕种，荒漠地带逐渐被农田取代，地表裸露的松散沙尘在一定程度上得以整治，盐尘暴发生频率整体有所降低。但环咸海地区与卡拉库姆等个别沙漠中心地带长期缺乏水资源补给，多风的干旱大陆性气候条件和富含细粒土的开阔地貌非常有利于该地区沙尘暴的发展，仍表现出较高的暴发频率（40 $ds\cdot a^{-1}$）[49]。可见沙漠环境作为一个整体，其存在与否、规模大小是影响盐尘暴频繁暴发的关键因素。

2.4 灌溉农业与国家社会经济发展的关系

作为典型的农业大国，乌兹别克斯坦的农业是其重要的经济支柱，贡献约三成国内生产总值（GDP），并为全国提供27%的就业机会。对比21世纪以来乌兹别克斯坦GDP、农业、工业及服务业产值增速，结果如图6所示，可以看出乌兹别克斯坦总人口逐年稳步上升，2009年后呈现较快的增长速度，代表着更多劳动力的同时也意味着更大的粮食需求量，国内生产总值同样逐年平稳增长，年均增速基本维持在5%~8%之间。三大产业中，农业产值增速与GDP一致性较高，农业快速发展时，GDP增长迅速；而农业发展受阻则会导致GDP增速放缓。这说明乌兹别克斯坦农业发展在一定程度上决定了GDP走势，且这种依附关系十分紧密，可缓解工业或服务业产值的小幅度变动影响。

乌兹别克斯坦同其他加盟共和国一样，其传统农业受管于集体农场和国营农场双重制度。苏联时代的最后几十年间，农户自留地虽然仅占总耕地面积的3%，但过剩的生产力使得农户将大量产物出售给国营合作系统，可创造乌兹别克斯坦农业生产总值的20%~25%，远高于其土地份额。这一方面是因为乌兹别克斯坦集中完善的畜牧业生产制度可创造大量经济收入；另一方面，农户自留地多种植高经济效益的作物，如马铃薯、蔬菜、水果总产量分别占全国产量的30%、45%、60%，棉花和谷物等需要大量资本投入和机械化的规模作物主要由集体和国营农场种植。

Lerman在其研究中指出，1990年乌兹别克斯坦出台的新《土地法》，提高灌溉面积上限并为居民分包更多耕地，使得农户自留地总面积在数年内从2.5×10^5 hm^2增加至4×10^5 hm^2。但租赁合同规定农户从国家承包的每块耕地都需保证棉花和小麦的最低播种面积，1998年《农民农场法》进一步规定，租赁土地应尽职耕种，以达到棉花和小麦的最低收获量[50]。结合本文2.2节中农业种植结构的转型趋势，可以发现全国小麦及棉花总产量在20世纪末到本世纪初均快速增长，促使乌兹别克斯坦农业产值同步提高，于2004年达到峰值8.3%。随着灌溉农业规模的不断扩大，灌排网络超负荷运行并最终导致输水效率及小麦增产速率的降低，但受迫于极度短缺的水资源与粮食缺口问题，种植类型不得不继续转向耗水量较小且产量高的小麦，进而再次加重灌排系统运行压力，逐渐形成难以突破的恶性循环[51]。正如Bobojonov等在干旱区农业可持续发展



注：数据来源于乌兹别克斯坦国家统计局。

图6　乌兹别克斯坦农业与经济发展动态

Fig. 6　Dynamic of Uzbekistan's agriculture and economy developments

预测研究中的结论所示：干旱地区低效的灌溉难以应对自然和人为水资源短缺问题，通过将棉花和水稻等转向需水量更少的作物可缓解供水不稳定所带来的影响；此外，迫切需要政府投入技术及资金补贴以推广更高效的灌溉技术，从而在根本上解决日后水资源短缺问题的出现[52]。2007年，乌兹别克斯坦政府成立了用于改善基础设施的特别基金。随着排查检修工作的开展，布哈拉、卡什卡达里亚、费尔干纳等干地农田排水渠在都得到了一定程度的恢复，小麦产量得到提高并于2016年达到最大值7×10^6 t，占同时期全国粮食产量的85%，成为农业产值组成中最重要的一部分，使农业经济总量回升至GDP的33%附近[9,30,52]。2016—2018年，灌溉面积虽然出现小幅度增长，但受种植作物转型的影响，农业产值增速随小麦产量同步略微下降，并维持在5%~7%之间[53]。

3　结 论

本文基于对乌兹别克斯坦农业灌溉、人口、经济等数据的梳理，总结了乌兹别克斯坦灌溉农业的发展对区域环境及社会经济的影响，为干旱地区灌溉农业发展及水资源管理提供科学的参考价值。主要结论如下：

（1）乌兹别克斯坦作为干旱地区典型农业大国，农业产值是其重要的经济来源，创造约三成国内生产总值，且对国内生产总值有显著的正向影响，其灌溉农业发展稳定向好，潜力巨大。

（2）主要农作物逐渐由棉花转型至冬小麦非但未能缓解农业用水紧张，反而加重水资源流失。治理此问题还需从根本上优化农田灌排技术，例如大面积推行滴灌、喷灌、暗管排盐等先进高效的灌排方案。

（3）乌兹别克斯坦农业灌溉水源主要来自河水截流，导致下游咸海蓄水量显著下降，并引发土壤盐渍化、河流湖泊水矿化度逐年增加、盐(沙)尘暴频发等环境问题，破坏当地水文循环过程。

参考文献（References）

[1] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108 (50): 20260–20264.

[2] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. Nature, 2012, 490

(7419): 254–257.

[3] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11): 3300–3310. [Wang Xinyuan, Zhao Xueyong, Li Yulin, et al. Effects of environmental factors on litter decomposition in arid and semi-arid regions: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(11): 3300–3310.]

[4] Huang J, Yu H, Guan X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 166–171.

[5] Deng H, Chen Y. Influences of recent climate change and human activities on water storage variations in Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2017, 544: 46–57.

[6] 郝海超, 郝兴明, 花顶, 等. 2000—2018年中亚五国水分利用效率对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 1–14. [Hao Haichao, Hao Xingming, Hua Ding, et al. Response of water use efficiency to climate change in five Central Asian countries from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 1–14.]

[7] Lioubimtseva E, Henebry C M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(11): 963–977.

[8] Xu B R, Lu Z X, Liu S Y. Glacier changes and their impacts on the discharge in the past half-century in Tekes watershed, Central Asia[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2015, 89–90: 96–103.

[9] Abdullaev I D, Fraiture C, Giordano M, et al. Agricultural water use and trade in Uzbekistan: Situation and potential impacts of market liberalization[J]. International Journal of Water Resources Development, 2009, 25(1): 47–63.

[10] 马大正, 冯锡时. 中亚五国史纲[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2000: 266–273. [Ma Dazheng, Feng Xishi. Outline of the history of the five countries in Central Asia[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 2000: 266–273.]

[11] Ibrakhimov M, Martius C, Lamers J P A, et al. The dynamics of groundwater table and salinity over 17 years in Khorezm[J]. Agricultural Water Management, 2011, 101(1): 52–61.

[12] Mateo S J, Marjani S, Turral H. More people, more food, worse water? A global review of water pollution from agriculture[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018: 93–105.

[13] Crosa G, Froebrich J, Nikolayenko V, et al. Spatial and seasonal variations in the water quality of the Amu Darya River (Central Asia)[J]. Water Research, 2006, 40(11): 2237–2245.

[14] Jacques C, Peter O, Philip M. Dying and Dead Seas climatic versus anthropic causes[M]. Dordecht: Springer Netherlands, 2004: 34–41.

[15] 梁倩, 光莹, 刘琼, 等. 新疆及周边中亚地区中亚低涡背景下云中液态水分布研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 72–78. [Liang Qian, Guang Ying, Liu Qiong, et al. Distribution of total cloud liquid water in Xinjiang and its surrounding Central Asia under the background of low vortex in Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 72–78.]

[16] Groll M, Opp C, Kulmatov R, et al. Water quality, potential conflicts and solutions: An upstream-downstream analysis of the transnational Zarafshan River (Tajikistan, Uzbekistan)[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(2): 743–763.

[17] Egamberdieva D, Kamilova F, Validov S, et al. High incidence of plant growth-stimulating bacteria associated with the rhizosphere of wheat grown on salinated soil in Uzbekistan[J]. Environmental Microbiology, 2008, 10(1): 1–9.

[18] 王旋旋, 陈亚宁, 李稚, 等. 基于模糊综合评价模型的中亚水资源开发潜力评估[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 126–134. [Wang Xuanxuan, Chen Yaning, Li Zhi, et al. Assessment of the development potential of water resources in Central Asia based on fuzzy comprehensive evaluation model[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 126–134.]

[19] Kulmatov R, Mirzaev J, Abuduwaili J, et al. Challenges for the sustainable use of water and land resources under a changing climate and increasing salinization in the Jizzakh irrigation zone of Uzbekistan[J]. Journal of Arid Land, 2020, 12(1): 90–103.

[20] Lerman Z. Agricultural development in Uzbekistan: The effect of ongoing reforms[R]. Israel: Hebrew University of Jerusalem, Department of Agricultural Economics and Management, 2008.

[21] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO's Global Information System on Water and Agriculture[DB/OL]. [2020-05-18]. http://www.fao.org/nr/water/Aquastat/countries_regions/Profile_segments/UZB-IrrDr_eng.stm.

[22] Lerman Z. Agricultural development in Central Asia: A survey of Uzbekistan, 2007—2008[J]. Eurasian Geography and Economics, 2008, 49(4): 481–505.

[23] 胡汝骥, 陈曦, 姜逢清, 等. 人类活动对亚洲中部水环境安全的威胁[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 189–197. [Hu Ruji, Chen Xi, Jiang Fengqing, et al. Threat of human activities to hydrological regime in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(2): 189–197.]

[24] Ruan H W, Yu J J, Wang P, et al. Increased crop water requirements have exacerbated water stress in the arid transboundary rivers of Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2020, 713: 136585, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136585.

[25] 阮宏威, 于静洁. 1992—2015年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1292–1304. [Ruan Hongwei, Yu Jingjie. Changes in land cover and evapotranspiration in the five Central Asian countries from 1992 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1292–1304.]

[26] Djanibekov N, Sommer R, Djanibekov U. Evaluation of effects of cotton policy changes on land and water use in Uzbekistan: Application of a bio-economic farm model at the level of a water users association[J]. Agricultural Systems, 2013, 118: 1–13.

[27] Conrad C, Rahmann M, Machwitz M, et al. Satellite based calculation of spatially distributed crop water requirements for cotton and wheat cultivation in Fergana Valley, Uzbekistan[J]. Global and Planetary Change, 2013, 110: 88–98.

[28] Lee S O, Jung Y. Efficiency of water use and its implications for a

water-food nexus in the Aral Sea Basin[J]. Agricultural Water Management, 2018, 207: 80-90.

[29] 徐婷, 邵华, 张弛. 近32 a中亚地区气温时空格局分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(1): 25-35. [Xu Ting, Shao Hua, Zhang Chi. Temporal pattern analysis of air temperature change in Central Asia during 1980—2011[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(1): 25-35.]

[30] Kulmatov R, Groll M, Rasulov A, et al. Status quo and present challenges of the sustainable use and management of water and land resources in Central Asian irrigation zones: The example of the Navoi region (Uzbekistan)[J]. Quaternary International, 2018, 464: 396-410.

[31] Rakhimbaev F, Bezpalov M, Khamidov M, et al. Peculiarities of crop irrigation in lower Amu Darya River areas[M]. Tashkent, Uzbekistan: FAN, 1992: 34-58.

[32] Mirzakhayot I, Asia K, Irina F, et al. Groundwater table and salinity: Spatial and temporal distribution and influence on soil salinization in Khorezm region (Uzbekistan, Aral Sea Basin)[J]. Irrigation Drainage Systems, 2007, 21(3-4): 219-236.

[33] Kulmatov R, Rasulov A, Kulmatova D, et al. The modern problems of sustainable use and management of irrigated lands on the example of the Bukhara region (Uzbekistan)[J]. College Composition & Communication, 2015, 7(12): 956-971.

[34] 吴敬禄, 马龙, 吉力力·阿不都外力. 中亚干旱区咸海的湖面变化及其环境效应[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 418-422. [Wu Jinglu, Ma Long, Abuduwaili Gilili. Lake surface change of the Aral Sea and its environmental effects in the arid region of the Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 418-422.]

[35] McKinney D C. Cooperative management of transboundary water resources in Central Asia[M]. Washington D.C.: National Defense University Press, 2004: 187-220.

[36] Cretaux J F, Letolle R, Berge-Nguyen M. History of Aral Sea level variability and current scientific debates[J]. Global and Planetary Change, 2013, 110: 99-113.

[37] Glantz M H. Aral Sea Basin: A sea dies, a sea also rises[J]. Ambio, 2007, 36(4): 323-327.

[38] Gaybullaev B, Chen S C, Gaybullaev G. The large Aral Sea water balance: A future prospective of the large Aral Sea depending on water volume alteration[J]. Carbonates and Evaporites, 2014, 29(2): 211-219.

[39] Jin L Y, Chen F H, Carrie M, et al. Causes of early Holocene desertification in arid Central Asia[J]. Climate Dynamics, 2012, 38(7): 1577-1591.

[40] Dubovyk O, Menz G, Conrad C, et al. Spatio-temporal analyses of cropland degradation in the irrigated lowlands of Uzbekistan using remote-sensing and logistic regression modeling[J]. Environmental Monitoring Assessment, 2013, 185(6): 4775-4790.

[41] Christopher C, Bjrn O K, John P A. Quantifying water volumes of small lakes in the inner Aral Sea Basin, Central Asia, and their potential for reaching water and food security[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(11): 1-16.

[42] Zhang F, Tashpolat T, Verner C J, et al. The influence of natural and human factors in the shrinking of the Ebinur Lake, Xinjiang, China, during the 1972—2013 period[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014. 187(1): 4128. doi: 10.1007/s10661-014-4128-4.

[43] Orlovsky N, Orlovsky L, 杨有林, 等. 20世纪60年代以来中亚地区的盐尘暴[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 20-29. [Orlovsky N, Orlovsky L, Yang Youlin, et al. Salt duststorms of Central Asia since 1960s[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(1): 20-29.]

[44] Gill T E. Eolian sediments generated by anthropogenic disturbance of playas: Human impacts on the geomorphic system and geomorphic impacts on the human system[J]. Geomorphology, 1996, 17(1-3): 207-228.

[45] 刘金平, 包安明, 李均力, 等. 2001—2013年中亚干旱区季节性积雪监测及时空变异分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(2): 405-412. [Liu Jinping, Bao Anming, Li Junli, et al. Spatial and temporal characteristics of snow cover in arid area of Central Asia from 2001 to 2013[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(2): 405-412.]

[46] 吉力力·阿不都外力, 木巴热克·阿尤普, 刘东伟, 等. 中亚五国水土资源开发及其安全性对比分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 960-968. [Abuduwaili Gilili, Ayoupu Mubarek, Liu Dongwei, et al. Comparative analysis of the land-water resources exploitation and its safety in the five countries of Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5): 960-968.]

[47] Kulmatov R. Problems of sustainable use and management of water and land resources in Uzbekistan[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2014, 6(1): 35-42.

[48] Orlovsky L G, Tolkacheva N O, et al. Dust storms as a factor of atmospheric air pollution in the Aral Sea Basin[J]. Air Pollution XII, 2004, 74: 353-362.

[49] Issanova G, Abuduwaili J. Aeolian processes as dust storms in the deserts of Central Asia[M]. Singapore: Springer Nature, 2017: 52-63.

[50] Lerman Z. Land reform, farm structure, and agricultural performance in CIS countries[J]. China Economic Review, 2009, 20(2): 316-326.

[51] 肖金波, 曲昊月. 乌兹别克斯坦农业经济改革及发展成效[J]. 安徽工业大学学报(社会科学版), 2018, 35(4): 30-33, 35. [Xiao Jinbo, Qu Haoyue. Agricultural economy reform and development effectiveness in Uzbekistan[J]. Journal of Anhui University of Technology (Social Sciences Edition), 2018, 35(4): 30-33, 35.]

[52] Bobojonov I, Franz J, Berg E, et al. Improved policy making for sustainable farming: A case study on irrigated dryland agriculture in western Uzbekistan[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2010, 34(7): 800-817.

[53] Opp C, Groll M, Aslanov I, et al. Aeolian dust deposition in the southern Aral Sea region (Uzbekistan): Ground-based monitoring results from the LUCA project[J]. Quaternary International, 2017, 429: 86-99.

Development of irrigated agriculture in Uzbekistan and its impact on ecological environment and economic development

LI Qi[1,2], LI Fadong[1,2,3], WANG Guoqin[1,4], QIAO Yunfeng[1,3], Rashid KULMATOV[5], PENG Yu[1,3], Sayidjakhon KHASANOV[6], LIU Hongguang[2], HE Xinlin[2], YANG Guang[2]

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institution of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. United Nations Environment Programme-International Ecosystem Management Partnership (UNEP-IEMP), Beijing 100101, China; 5. National University of Uzbekistan, Tashkent 100170, Uzbekistan; 6. Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers, Tashkent 100000, Uzbekistan)

Abstract: In this paper, the latest relevant data of Uzbekistan were obtained from the databases of the Food and Agriculture Organization of the United Nations and the United Nations data retrieval system. The development history of irrigated agriculture was investigated by analyzing the data on irrigated areas and the population and economic development in the country, and a series of environmental problems caused by unreasonable irrigation and their impact on the social economy were discussed. The results demonstrated that as Uzbekistan is a typical agricultural country, its irrigated agriculture has been developing steadily, supporting the food security and employment of the entire country. The agricultural irrigation area of Uzbekistan increased to 4.2×10^6 hm^2 in the 1990s and remained basically unchanged over the following 30 years. The main water sources for agricultural irrigation are the Amu Darya and Syr Darya rivers, and most irrigation methods are based on flood irrigation. Because of the dry climate with limited rainfall, long-term irrigation has led to a continuous decline of river flow and water storage in the Aral Sea. To cope with sluggish economic growth and food demand, increasing amounts of farmland were shifted from producing cotton to wheat in the 1990s, as wheat requires less water. However, the gradual phase-out of cotton exports in Uzbekistan and the conversion of its farmland from food to fruits and vegetables, done to transform its economic structure from over-reliance on agricultural production to a more economically rewarding system within the limited land, led to a sharp decline in wheat and cotton production in 2016. Additionally, the long-term use of relatively backward water supply systems and irrigation technology has caused a serious waste of water resources and a series of environmental problems. The flooding irrigation method coupled with strong evaporation and declining irrigation water quality along with the higher groundwater level has caused large-scale salinization of soil and made Uzbekistan the sixth largest country in terms of soil salinization, with a total of 2.1×10^6 hm^2 of salinized soil. The area of the Aral Sea also shrunk from $4.7\times10^6-4.8\times10^6$ to 1.2×10^6 hm^2 over the past 40 years, and the sea could vanish within the next 40 years, resulting in a significant reduction in water storage and a three-fold increase in salinity compared with 20 years ago. The drying up of the Aral Sea also exposed a large area of salty sediments and finally formed a new desert (the Aralkum) in 2000, causing frequent salt dust storms, which pose a serious threat to human respiratory health and the hydrological cycle. Agricultural production is economically important in Uzbekistan. It has a significant positive impact on gross domestic product and can effectively the effects of small fluctuations in the industrial and service sectors. Still, the problem of soil salinization in Uzbekistan is extremely complex. To effectively address the issue, it is necessary to fundamentally optimize the irrigation mode and drainage technology and implement advanced and efficient irrigation and drainage schemes, such as drip irrigation, sprinkler irrigation, and subsurface pipe network salt drainage. This study offers support for agricultural development and water resource management in arid areas.

Key words: irrigation; arid land; agriculture; cotton; wheat; Uzbekistan; Central Asia